



**UNIVERSITÀ DI PISA**  
**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

Scuola di Ingegneria  
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Biomedica

Anno accademico 2015/2016

**RILEVAZIONE ED ANALISI DI PARAMETRI  
LEGATI AL CICLO DEL PASSO  
ATTRAVERSO UNA CALZATURA  
SENSORIZZATA**

**Relatori**

Prof. Alessandro Tognetti  
Prof. Nicola Carbonaro  
Ing. Mario Tesconi

**Candidata**

Laura Lippi

La deambulazione è uno dei movimenti più comuni svolti dall'uomo ed è costituita da una serie di eventi ciclici degli arti inferiori. Questo tipo di attività permette lo spostamento del centro di gravità e la propulsione del corpo nello spazio. La valutazione delle fasi del passo può risultare importante per studiare i diversi eventi associati al ciclo del cammino, per prevenire eventuali danni agli arti inferiori e per valutare lesioni traumatiche o danni neurologici di un soggetto. Alcuni parametri importanti associati alla deambulazione, come numero di passi svolti, cadenza e durate percentuali delle diverse fasi del cammino, permettono uno studio approfondito di questo movimento. In particolare, il riconoscimento delle fasi legate al ciclo del passo può risultare importante sia per il controllo delle neuroprotesi degli arti inferiori sia per analizzare eventuali patologie dell'apparato locomotore.

I dispositivi più precisi ed accurati che possono essere utilizzati per analizzare il movimento del cammino sono i sistemi ottici di Motion Capture. Questi permettono la ricostruzione nello spazio del movimento del corpo, grazie all'utilizzo di opportuni marker di materiale retroriflettente, che vengono posizionati sul soggetto in base al movimento che si vuole analizzare. Utilizzando un sistema di illuminazione e un set di telecamere è quindi possibile registrare la posizione dei marker nello spazio, dalla cui elaborazione si ottiene la ricostruzione tridimensionale del movimento. Questi dispositivi, fanno una misura molto accurata, ma presentano alcuni svantaggi: sono ingombranti, costosi e non possono essere impiegati al di fuori di un laboratorio attrezzato. In particolare, non permettono di rilevare quei parametri relativi alla deambulazione in contesti naturali, ovvero durante le normali attività giornaliere dell'individuo. A causa delle limitazioni dei sistemi ottici, con il progredire della tecnologia sono stati sviluppati dei dispositivi indossabili (*wearable devices*), che permettono di effettuare la registrazione dei dati as-

sociati al cammino per lunghi periodi di tempo, in qualsiasi tipo di ambiente e durante le normali attività giornaliere. I sistemi indossabili hanno però lo svantaggio di essere meno precisi e fornire un numero di informazioni più ridotto rispetto ai sistemi di tipo ottico.

In questo lavoro di tesi sono state valutate le potenzialità di una calzatura sensorizzata (FootMoov) per l'estrazione di parametri legati alla biomeccanica del cammino. All'interno di FootMoov, durante il processo produttivo, viene integrata una scheda elettronica in cui sono presenti due sensori di pressione, posizionati sotto la pianta e il tallone del piede, e un accelerometro triassiale, posto in prossimità della punta della scarpa. Dai dati forniti dall'accelerometro si ottengono informazioni sul movimento del piede nello spazio, mentre dai sensori di forza si ricavano dei valori associati all'interazione del piede con il terreno. Nella scheda elettronica è presente anche un modulo wireless che permette la trasmissione dei dati ad un sistema mobile (PC, smartphone, tablet). Questi dispositivi esterni, grazie a specifiche applicazioni, consentono di acquisire e raccogliere i segnali provenienti dalla scarpa in modo continuo, per lunghi periodi di tempo e in ambienti esterni al laboratorio. FootMoov è stato sviluppato per essere commercializzato in ambito videoludico. Nell'ambito del tirocinio, legato a questo lavoro di tesi, sono stati sviluppati dei software per l'acquisizione e l'analisi dei dati provenienti da questo dispositivo e sono stati implementati degli algoritmi per il riconoscimento delle fasi del passo, in modo da ampliare l'utilizzo di FootMoov anche in ambito biomeccanico e biomedico. Sulla linea delle applicazioni presenti nei dispositivi mobili, è stato sviluppato un software, chiamato 'FIM', 'FootMoov Inside for Matlab'. Questo programma permette la connessione della scarpa al PC, la raccolta dei dati e la visualizzazione in real time dei segnali provenienti dai sensori. Dopo aver effettuato l'implementazione

di questo software, per capire se i segnali ottenuti dalla scarpa FootMoov potessero veramente risultare utili per l'analisi del passo, sono state fatte delle prove su un certo numero di soggetti normodotati, con caratteristiche diverse (età, peso e altezza). Le attività che sono state fatte svolgere sono: cammino, corsa, salire/scendere le scale, sedersi alzarsi da una sedia e cammino da fermo. Dopo la raccolta di tutti i dati relativi al protocollo di sperimentazione, è stata fatta la loro analisi grazie all'utilizzo di un secondo programma, chiamato 'FootMoov Analysis', anch'esso implementato con il linguaggio Matlab. Questo software permette il riconoscimento dell'attività svolta dal soggetto grazie ad un algoritmo, che parte proprio da alcuni parametri estratti dalle prove svolte. Questo programma permette inoltre di estrarre alcuni parametri legati al cammino (numero di passi e cadenza) e di effettuare la valutazione dei dati relativi alle diverse attività svolte durante il protocollo sperimentale.

Per completare l'analisi biomeccanica risulta importante verificare se dai dati estratti con FootMoov sia possibile riconoscere anche le diverse fasi del ciclo del cammino. E' stato quindi sviluppato un algoritmo per la discriminazione di alcuni periodi del cammino, ovvero capace di identificare le fasi di *stance-swing* e gli eventi di *heel strike* e *toe off*. Questo algoritmo si basa sull'utilizzo combinato dei segnali estratti da FootMoov (pressioni di tallone e pianta e componente y dell'accelerometro, che corrisponde alla direzione antero-posteriore del piede). Per validare i risultati ottenuti, è stata effettuata una comparazione con un sistema ottico di motion capture (BTS - SMART DX 100). Durante l'esperimento svolto in laboratorio è stato analizzato il cammino di un soggetto normodotato, studiando il movimento del piede nelle diverse fasi del ciclo del passo. Si sono poi confrontati i risultati ottenuti dall'algoritmo sviluppato con la misura di riferimento ottenuta con

il sistema ottico.

Dal software 'FootMoov Analysis' si ottengono dei buoni risultati sia per i parametri del passo identificati che per il classificatore delle attività. Per quanto riguarda i valori estratti dall'algoritmo implementato per la discriminazione delle fasi si ottiene una buona coincidenza con i valori di riferimento trovati per il sistema ottico. L'errore medio percentuale, ottenuto dal confronto delle fasi di *stance-swing* estratte con l'algoritmo implementato e la misura di riferimento del sistema ottico, è del 3.554%. In conclusione, risulta che FootMoov è uno strumento utile sia per effettuare l'analisi della biomeccanica del cammino che per estrarre alcuni parametri importanti legati al ciclo del passo. Si possono quindi avere diversi sviluppi futuri, tra cui: lo studio su soggetti con determinate patologie e l'applicazione della scarpa in combinazione a dispositivi di stimolazione e/o il controllo di neuroprotesi.